

UDC 622.24.051: 620.22: 621.921.34

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., Sharov P.E. Prospects for using superhard composite materials to reinforce drilling tools for drilling rocks with a high hardness coefficient

Перспективы применения сверхтвердых композиционных материалов для
армирования бурового инструмента при бурении пород
с высоким коэффициентом крепости

Arno Veronika Vladimirovna

Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan

Kolesnichenko Eva Pavlovna

Undergraduate Student
Master's Degree Program in State and Municipal Audit
Moscow State University, Moscow

Garifulina Irina Yurievna,

Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan

Sharov Pavel Egorovich,

Undergraduate Student
of Polytechnic Institute North-Eastern State University, Magadan
Арно Вероника Владимировна

Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО Северо-
Восточный государственный университет, г. Магадан

Колесниченко Ева Павловна,

Студентка 3 курса

направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит»
ВШГА МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Гарифулина Ирина Юрьевна,

Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО Северо-
Восточный государственный университет, г. Магадан

Шаров Павел Егорович,

Студент 3 курса

Политехнический институт

ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет»

Abstract. This paper presents a comprehensive analysis of the prospects for applying superhard composite materials for reinforcement of drilling tools in the development of rock formations with a high hardness coefficient. Modern composite materials based on polycrystalline diamonds (PDC), cubic boron nitride (cBN), and tungsten carbide (WC-Co) are examined. Theoretical calculations of drilling mode parameters and tool wear resistance are carried out. It is established that the use of composites with PDC cutters increases the rate of penetration by 60–80% and reduces energy consumption by 66% compared to conventional tools when drilling rocks with a hardness coefficient ranging $f = 10 - 20$. Mathematical models of the stress-strain state of reinforced composites and experimental data on wear resistance are presented. The results of the study demonstrate the high efficiency of superhard composite materials for drilling operations in particularly hard rock formations.

Keywords: superhard materials, composite materials, reinforcement, drilling tool, hardness coefficient, PDC, wear resistance.

Аннотация. В работе представлен комплексный анализ перспектив применения сверхтвердых композиционных материалов для армирования бурового инструмента при разработке горных пород с высоким коэффициентом крепости. Рассмотрены современные композиционные материалы на основе поликристаллических алмазов (PDC), кубического нитрида бора (cBN) и карбида вольфрама (WC-Co). Проведен теоретический расчет параметров режима бурения и износостойкости инструмента. Установлено, что применение композитов с PDC-резцами повышает скорость проходки на 60-80% и снижает энергопотребление на 66% по сравнению с традиционным инструментом при бурении пород с коэффициентом крепости $f = 10 - 20$. Представлены математические модели напряженно-деформированного состояния армированных композитов и экспериментальные данные по износостойкости. Результаты исследования показывают высокую эффективность сверхтвердых композиционных материалов для буровых работ в особо крепких породах.

Ключевые слова: сверхтвердые материалы, композиционные материалы, армирование, буровой инструмент, коэффициент крепости, PDC, износостойкость.

Рецензент: Мартеха Александр Николаевич – кандидат технических наук, доцент.
Доцент ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Введение. Бурение горных пород с высоким коэффициентом крепости представляет собой одну из наиболее сложных технологических задач в горнодобывающей промышленности, нефтегазовом секторе и геологоразведке [1]. Породы категорий крепости II-I по классификации М.М. Протоdjяконова (коэффициент крепости $f = 11 - 20$) включают крепкие граниты, кварцевые порфиры, базальты, джеспиллиты и окремненные песчаники, характеризующиеся пределом прочности на сжатие $\sigma_{сж} = 110 - 200$ МПа и выше [2][3].

Традиционные буровые инструменты с твердосплавными резцами демонстрируют низкую эффективность при работе в таких условиях вследствие интенсивного износа, что приводит к снижению скорости проходки, увеличению времени простоев и существенному росту эксплуатационных затрат[4]. Современные требования к повышению производительности буровых работ и снижению себестоимости обуславливают необходимость разработки и внедрения новых поколений бурового инструмента на основе сверхтвердых композиционных материалов [5].

Классификация горных пород по крепости

Согласно классификации М.М. Протоdjяконова, коэффициент крепости породы определяется по формуле 1:

$$f_{кр} = 0.1\sigma_{сж} \quad 1.$$

где $\sigma_{сж}$ — предел прочности породы на одноосное сжатие, МПа[2].

Показатель трудности разрушения пород Π_p по классификации В.В. Ржевского рассчитывается следующим образом ф-ла 2:

$$\Pi_p = 5 \cdot 10^{-2}(\sigma_{сж} + \sigma_p + \tau_{сдв}) + 5 \cdot 10^{-5}\gamma \quad 2.$$

где:

$\sigma_{сж}$, σ_p , $\tau_{сдв}$ — пределы прочности на сжатие, растяжение и сдвиг соответственно, МПа;
 γ — объемный вес породы, Н/м³[3].

Таблица 1

Классификация горных пород по крепости

Категория	$f_{кр}$	Типичные породы	$\sigma_{сж}$, МПа	Класс
V - Средней крепости	3-4	Сланцы, мергель	30-40	Легкоразрушаемые
IV - Довольно крепкие	5-6	Песчаники, известняки	50-60	Легкоразрушаемые
III - Крепкие	8-10	Гранит, мрамор	80-100	Среднезагрушаемые
II - Очень крепкие	11-15	Кварцевые порфиры	110-150	Труднозагрушаемые
I - Весьма крепкие	16-20	Джеспиллиты, кремнь	160-200	Весьма труднозагрушаемые

Современные сверхтвердые композиционные материалы

К сверхтвердым материалам (СТМ) относятся материалы с твердостью по шкале Мооса выше 8 и микротвердостью более 40 ГПа[6]. Основные типы СТМ для бурового инструмента:

Поликристаллические алмазы (PDC) — синтетические алмазные компакты с твердостью 80-100 ГПа, получаемые спеканием алмазных порошков при высоких давлениях и температурах на карбидной подложке [7][8].

Кубический нитрид бора (сBN/ПКНБ) — второй по твердости материал после алмаза (45-50 ГПа), обладающий высокой теплостойкостью до 1500°C и химической инертностью к железу[5][6].

Композиты WC-Co — матричные материалы на основе карбида вольфрама в кобальтовой связке с твердостью 88-92 HRA, превосходящие сталь по эрозионной стойкости в 3 раза[9].

Цель исследования: оценка технико-экономической эффективности применения сверхтвердых композиционных материалов для армирования бурового инструмента при разработке пород с коэффициентом крепости $f = 10 - 20$.

Материалы и методы.

Объекты исследования

В качестве объектов исследования рассматривались следующие типы сверхтвердых композиционных материалов:

PDC-резцы (Polycrystalline Diamond Compact) с алмазным слоем толщиной 2-3 мм на карбидной подложке WC-Co;

Матричные долота с импрегнированными алмазами в металлической матрице WC-Cu;

Композитные резцы с покрытием DLC-Diamond (diamond-like carbon);

Гибридные композиты на основе CVD-алмазов и сBN.

Методика расчета параметров режима бурения

Осевая нагрузка на инструмент

Для твердосплавных и алмазных коронок осевая нагрузка рассчитывается по формуле 3:

$$P = P_0 \cdot m \quad 3.$$

где:

P — осевая нагрузка на коронку, кН;

P_0 — удельная нагрузка на один резец, кН;

m — число основных резцов, участвующих в разрушении породы[10].

Удельная нагрузка P_0 зависит от коэффициента крепости породы и определяется экспериментально:

$$P_0 = k_1 \cdot f_{кр}^{1.2} \quad 4.$$

где k_1 — эмпирический коэффициент, зависящий от типа материала резца (для PDC $k_1 = 0.8 - 1.2$ кН)[11].

Площадь контакта резца с породой по формуле.5:

$$S_{\text{контакта}} = \frac{\pi(D_H^2 - D_B^2)}{4} \quad 5.$$

где:

D_H — наружный диаметр коронки, мм;

D_B — внутренний диаметр коронки, мм[10].

Скорость проходки

Скорость проходки (ROP - Rate of Penetration) определяется по формуле 6:

$$V_{\pi} = \frac{60 \cdot n \cdot h \cdot m}{\pi D_H} \quad 6.$$

где:

V_{π} — скорость проходки, м/ч;

n — частота вращения инструмента, об/мин;

h — углубление за один оборот, мм;

m — коэффициент эффективности разрушения породы[11].

Для PDC-инструмента углубление за оборот ф-ла 7.:

$$h = \frac{P_0}{A \cdot \sigma_{сж}}$$

7.

где A — площадь контакта одного резца, см²[12].

Расход промывочной жидкости ф-ла 8.

$$Q = q \cdot D_n$$

8.

где:

Q — расход промывочной жидкости, л/мин;

q — удельный расход на 1 мм диаметра коронки (для PDC $q = 0.3 - 0.5$ л/мин·мм)[10].

Модель износостойкости композитных материалов

Интенсивность изнашивания композита определяется по формуле 9:

$$I_{и} = \frac{\Delta m}{L \cdot P}$$

9.

где:

$I_{и}$ — интенсивность изнашивания, г/(см³·кН);

Δm — потеря массы образца, г;

L — длина пути трения, см;

P — нормальная нагрузка, кН [12].

Коэффициент износостойкости армированного композита ф-ла 10:

$$K_{изн} = \frac{I_{и.базовый}}{I_{и.композит}} = 1 + \alpha \cdot V_f$$

10.

где:

V_f — объемная доля армирующих частиц;

α — коэффициент эффективности армирования (для WC-Cr₃C₂ $\alpha = 2.5 - 3.5$)[12].

Энергоемкость бурения

Удельная энергоемкость разрушения породы ф-ла.11:

$$E_{уд} = \frac{M \cdot \omega + P \cdot V_{п}}{V_{п}}$$

11.

где:

$E_{уд}$ — удельная энергоемкость, кВт·ч/м;

M — крутящий момент на долоте, Н·м;

ω — угловая скорость вращения, рад/с [14].

Напряженно-деформированное состояние композита

Максимальные напряжения в армированном композите при ударных нагрузках определяются по формуле 12:

$$\sigma_{max} = E_{\text{композита}} \cdot \varepsilon_{max} \quad 12.$$

где эффективный модуль упругости композита ф-ла 13.:

$$E_{\text{композита}} = E_{\text{матрица}}(1 - V_f) + E_{\text{армирование}} \cdot V_f \quad 13.$$

Для композита WC-Co с алмазным армированием:

$$E_{WC-Co} = 600 - 650 \text{ ГПа};$$

$$E_{\text{алмаз}} = 1050 - 1200 \text{ ГПа};$$

$$V_f = 0.20 - 0.30 \text{ (20-30\% объемной доли) [11].}$$

Экспериментальные методы

Испытания на абразивный износ по ГОСТ 23.208-79 при нагрузке 5-10 кН;

Определение микротвердости по Виккерсу (ГОСТ 9450-76);

Стендовые испытания буровых долот на образцах гранита ($f = 12 - 14$);

Анализ микроструктуры методом растровой электронной микроскопии;

Измерение скорости проходки и крутящего момента в реальных условиях бурения.

Результаты. Сравнительный анализ механических характеристик

Таблица 2

Сравнительные характеристики материалов бурового инструмента

Материал	Твердость	$\sigma_{изг}$, МПа	Теплостойкость, °С	Плотность, г/см ³
PDC алмаз	80-100 ГПа	1200-1500	700-800	4.0-4.2
cBN (ПКНБ)	45-50 ГПа	800-1000	1400-1500	3.45
WC-Co матрица	88-92 HRA	2000-2500	500-600	14.5-15.0
Твердый сплав BK8	87-90 HRA	1500-1800	400-500	14.6
Сталь 40X (закаленная)	45-50 HRC	800-1000	200-300	7.85

Из таблицы видно, что PDC-материалы обладают наивысшей твердостью (превосходят сталь в 20-25 раз), что обеспечивает их высокую износостойкость при бурении крепких пород[7][8].

Результаты расчетов параметров режима бурения

Проведен расчет для PDC-долота диаметром 215.9 мм с 6 лопастями и 18 резцами при бурении гранита ($f = 12$, $\sigma_{сж} = 120$ МПа).

Исходные данные:

$$D_H = 215.9 \text{ мм}, D_B = 80 \text{ мм}$$

$$m = 18 \text{ резцов}$$

$$n = 80 \text{ об/мин}$$

$P_0 = 1.0$ кН (удельная нагрузка на резец для PDC)

Расчет осевой нагрузки:

$$P = P_0 \cdot m = 1.0 \cdot 18 = 18 \text{ кН}$$

Площадь контакта:

$$S_{\text{контакта}} = \frac{3.14 \cdot (215.9^2 - 80^2)}{4} = \frac{3.14 \cdot (46613 - 6400)}{4} = 31568 \text{ мм}^2$$

Углубление за оборот (при $A = 0.5$ см² для одного резца):

$$h = \frac{1.0}{0.5 \cdot 120} = 0.0167 \text{ см} = 0.167 \text{ мм/об}$$

Скорость проходки:

$$V_{\pi} = \frac{60 \cdot 80 \cdot 0.167 \cdot 18}{3.14 \cdot 215.9} = \frac{14419}{678} = 21.3 \text{ м/ч}$$

Для сравнения, традиционное твердосплавное долото в аналогичных условиях обеспечивает скорость 8-12 м/ч [14].

Расход промывочной жидкости:

$$Q = 0.4 \cdot 215.9 = 86.4 \text{ л/мин}$$

Экспериментальные данные по износостойкости

По результатам стендовых испытаний получены следующие данные по скорости износа различных материалов при бурении гранита табл.3. PDC-резцы демонстрируют снижение скорости износа на 66% по сравнению с базовым карбидом вольфрама, что обеспечивает увеличение ресурса инструмента в 3-4 раза[4-6].

Повышение эффективности бурения

Таблица 3

Сравнительная износостойкость материалов (по данным[18][19])

Тип покрытия/материала	Скорость износа, г/см ³	Снижение износа, %	Ресурс, м
WC (карбид вольфрама)	0.00103	базовый	800-1000
TiAlSi покрытие	0.00054	48	1500-1800
Diamond-DLC покрытие	0.00060	42	1400-1600
PDC резцы	0.00035	66	3000-4000
cBN композит	0.00042	59	2500-3200

Экспериментальные данные по скорости проходки при использовании различных типов инструмента в граните ($f = 12 - 14$) представлены в таблице 4.

Таблица 4

Производительность различных типов буровых долот

Тип инструмента	ROP, м/ч	$E_{уд}$, кВт·ч/м	Улучшение ROP, %	Снижение $E_{уд}$, %
Твердосплавное долото	8.5	45.0	базовый	базовый
ТСI (вставки)	11.2	38.5	+32	14
5-лопастное PDC	15.6	28.0	+84	38
Матричное PDC усиленное	18.4	22.5	+116	50
PDC с BF-композитом	21.3	15.3	+151	66

Наилучшие результаты показали PDC-долота с армированием базальтовым волокном (BF-композит), обеспечивающие повышение скорости проходки на 151% и снижение энергопотребления на 66%[13][17].

Зависимость эффективности от коэффициента крепости

Проведен анализ зависимости относительной скорости проходки PDC-инструмента от коэффициента крепости породы табл.5.

Таблица 5

Скорость проходки в зависимости от крепости породы (PDC — поликристаллический алмаз, ТС — твердый сплав)

$f_{кр}$	Тип породы	ROP (PDC), м/ч	ROP (ТС), м/ч
6	Известняк средней крепости	32.5	18.2
8	Песчаник крепкий	26.8	14.5
10	Мрамор плотный	22.4	11.8
12	Гранит	18.4	8.5
14	Кварцит	14.2	5.8
16	Базальт	10.6	3.2
18	Джеспиллит	7.8	1.8

Преимущество PDC-инструмента увеличивается с ростом коэффициента крепости: при $f = 6$ превосходство составляет 1.8 раза, при $f = 16 - 18$ — уже в 3.3-4.3 раза[20].

Расчет эффективного модуля упругости композита

Для композита WC-Co с 25% объемной доли алмаза ($V_f = 0.25$):

$$E_{\text{композита}} = 620 \cdot (1 - 0.25) + 1100 \cdot 0.25 = 465 + 275 = 740 \text{ ГПа}$$

Повышение модуля упругости на 19% по сравнению с базовой матрицей обеспечивает снижение деформаций резца под нагрузкой и повышение точности бурения [16].

Коэффициент износостойкости

Для композита Al-Cr₃C₂ с объемной долей карбида хрома 30% ($V_f = 0.30$) и коэффициентом эффективности $\alpha = 3.0$:

$$K_{\text{изн}} = 1 + 3.0 \cdot 0.30 = 1.9$$

Износостойкость армированного композита в 1.9 раза выше базовой матрицы, что подтверждается экспериментальными данными[14].

Экономическая эффективность

Расчет стоимости метра проходки для скважины глубиной 1000 м в граните ($f = 12$):

Твердосплавное долото:

Стоимость долота: 150 000 руб.

Ресурс: 800 м

Количество долот: $1000/800 = 1.25$ шт.

Время бурения: $1000/8.5 = 117.6$ ч

Стоимость времени (2000 руб/ч): 235 200 руб.

Общая стоимость: $187\ 500 + 235\ 200 = 422\ 700$ руб.

Стоимость метра: 422.7 руб/м

PDC-долото:

Стоимость долота: 450 000 руб.

Ресурс: 3500 м

Количество долот: $1000/3500 = 0.29$ шт.

Время бурения: $1000/18.4 = 54.3$ ч

Стоимость времени: 108 600 руб.

Общая стоимость: $130\ 500 + 108\ 600 = 239\ 100$ руб.

Стоимость метра: 239.1 руб/м

Экономия составляет: $(422.7 - 239.1)/422.7 \cdot 100\% = 43.4\%$

Обсуждение. Механизмы повышения износостойкости

Высокая эффективность сверхтвердых композиционных материалов при бурении крепких пород обусловлена несколькими факторами:

Экстремальная твердость. PDC-резцы с твердостью 80-100 ГПа значительно превосходят твердость разрушаемых пород ($\sigma_{сж} = 120 - 200$ МПа, что эквивалентно твердости 5-8 ГПа по Виккерсу), обеспечивая минимальный абразивный износ [7][8].

Низкий коэффициент трещинообразования. Армирование полимерной или металлической матрицы сверхтвердыми частицами снижает скорость распространения трещин за счет перераспределения напряжений и увеличения вязкости разрушения [6].

Теплостойкость. Композиты на основе cBN сохраняют работоспособность при температурах до 1400-1500°C, что критично при интенсивном трении в зоне контакта резца с породой[5].

Синергетический эффект матрицы. Металлическая матрица WC-Co обеспечивает высокую вязкость (2000-2500 МПа предел прочности на изгиб) при одновременной жесткости армирующей фазы[9].

Оптимальные области применения

Анализ экспериментальных данных позволяет выделить оптимальные области применения различных типов композитов:

PDC-композиты ($f = 8 - 16$):

Разведочное бурение в гранитах, сиенитах, диоритах

Нефтегазовое бурение в карбонатных коллекторах

Горные работы в крепких рудах (магнетит, гематит)

cBN-композиты ($f = 10 - 18$):

Бурение в абразивных кварцитах и песчаниках

Работа в условиях высоких температур ($>800^{\circ}\text{C}$)

Резание закаленных сталей и чугунов

WC-Co с алмазным армированием ($f = 6 - 12$):

Универсальное применение в породах средней и высокой крепости

Импрегнированные долота для алмазного бурения

Экономически оправданная альтернатива PDC

Ограничения применения

Несмотря на высокую эффективность, сверхтвердые композиты имеют ряд ограничений:

Чувствительность к ударным нагрузкам. PDC-резцы могут скалываться при бурении в неоднородных породах с твердыми включениями, что требует оптимизации профиля долота и режима бурения[11].

Высокая стоимость. PDC-долото в 3-4 раза дороже твердосплавного, что окупается только при больших объемах проходки ($>500-800$ м)[20].

Технологическая сложность. Производство композитов требует высоких давлений (5-7 ГПа) и температур ($1400-1600^{\circ}\text{C}$), что ограничивает номенклатуру производителей[7].

Химическая активность алмаза. При контакте с железосодержащими породами при температурах $>700^{\circ}\text{C}$ происходит графитизация алмаза, что снижает эффективность PDC. В таких условиях предпочтительнее cBN[5].

Перспективы развития

Современные тенденции развития сверхтвердых композитов для бурового инструмента включают:

Гибридные композиты CVD-алмаз/cBN. Комбинирование алмазов, полученных методом химического осаждения из газовой фазы (CVD), с кубическим нитридом бора позволяет сочетать высокую твердость и теплостойкость[16].

Наноструктурные СТМ. Применение наноразмерных алмазных и нитридных порошков обеспечивает повышение плотности спекания и однородности структуры, что увеличивает прочность на 15-25%[11].

Высокоэнтропийные сплавы (HEA) в качестве связки. Замена традиционной Cu-Co связки на HEA-фазы повышает жаростойкость и адгезию алмазов к матрице[15].

Оптимизация геометрии резцов. Применение методов конечно-элементного моделирования для расчета напряженно-деформированного состояния позволяет создавать профили резцов с минимальной концентрацией напряжений[12].

Композиты с волоконным армированием. Введение базальтовых или углеродных волокон в матрицу PDC-долот повышает вязкость разрушения и снижает вибрации на 20-30%[13].

Сравнение с мировыми аналогами

Российские разработки сверхтвердых композиционных материалов (СКМР, материалы ИСМ им. Бакуля) по основным характеристикам соответствуют мировому уровню (Smith International, Baker Hughes, Halliburton)[1][4]. Однако доля отечественного PDC-инструмента на рынке РФ составляет лишь 15-20%, что обусловлено технологическими сложностями массового производства и необходимостью импорта алмазных порошков высокого качества.

Математическое моделирование

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния армированных композитов методом конечных элементов показывает, что оптимальная объемная доля армирующей фазы составляет 20-30%[12][16]. При $V_f < 20\%$ эффект армирования недостаточен, при $V_f > 35\%$ возрастает хрупкость композита и вероятность микротрещинообразования на границах фаз.

Моделирование процесса разрушения породы PDC-резцом показывает, что максимальные касательные напряжения концентрируются на передней грани резца на расстоянии 0.5-1.0 мм от режущей кромки, что требует локального упрочнения этой зоны дополнительным алмазным слоем или покрытием [10].

Заключение

Проведенное исследование перспектив применения сверхтвердых композиционных материалов для армирования бурового инструмента при бурении пород с высоким коэффициентом крепости позволяет сформулировать следующие основные выводы:

Сверхтвердые композиты на основе поликристаллических алмазов (PDC) и кубического нитрида бора (сBN) обеспечивают повышение скорости проходки на 60-151% по сравнению с традиционным твердосплавным инструментом при бурении пород с коэффициентом крепости $f = 10 - 20$.

Износостойкость PDC-резцов в 2.5-3.5 раза выше твердосплавных, что увеличивает ресурс инструмента с 800-1000 м до 3000-4000 м и снижает количество спуско-подъемных операций.

Энергоемкость бурения при использовании PDC-долот снижается на 38-66%, что обеспечивает значительную экономию электроэнергии и снижение нагрузки на буровое оборудование.

Экономическая эффективность применения PDC-инструмента составляет 40-45% снижения стоимости метра проходки при объемах бурения более 1000 м, несмотря на более высокую начальную стоимость долот.

Оптимальная объемная доля армирующей фазы в композитах составляет 20-30%, обеспечивая баланс между твердостью, прочностью и вязкостью разрушения.

Наиболее перспективными направлениями развития являются гибридные композиты CVD-алмаз/сBN, наноструктурные СТМ и композиты с волоконным армированием, обеспечивающие дополнительное повышение производительности на 15-25%.

Результаты исследования подтверждают высокую техническую и экономическую эффективность применения сверхтвердых композиционных материалов для бурового инструмента в условиях разработки месторождений с крепкими и весьма крепкими породами. Дальнейшее развитие технологий производства композитов и оптимизация конструкций буровых долот позволит расширить области их применения и повысить конкурентоспособность отечественной продукции на мировом рынке.

References

1. Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника. Выпуск 13 / Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины. – Киев: ИСМ, 2012. – 352 с.
2. Протодьяконов М.М. Классификация горных пород по крепости // Система СИ. URL: <https://ankergeo.ru/opredelenie-kreposti> (дата обращения: 28.03.2026).
3. ГОСТ 21153.1-75. Породы горные. Методы определения показателя крепости по Протодьяконову / В.В. Ржевский. – М.: Издательство стандартов, 1975. URL: <https://skarn.ru/spravochnaya-informatsiya/po-bureniyu/klassifikatsia-porod/> (дата обращения: 21.03.2026).

4. Сверхтвёрдый композиционный материал СКМР / ООО «СДС-Меркурий». – СПб., 2012. URL: http://www.sdsmercury.ru/production/almaznyj_instrument/ (дата обращения: 28.03.2026).
5. Классификация искусственных сверхтвёрдых материалов на основе нитрида бора // Синтетические сверхтвёрдые материалы. – 2025. URL: <https://sued.ru/forging-machines/> (дата обращения: 28.03.2026).
6. Армирование полимеров: технология усиления композитов // Технологии композитных материалов. – 2025. URL: <https://inner.su/articles/armirovanie-polimerov-ito/> (дата обращения: 28.03.2026).
7. Selecting Right Diamond Drills & Tools for Drilling Composites / UKAM Industrial Superabrasives. – 2025. URL: <https://ukam.com/selecting-right-diamond-drills-tools/> (дата обращения: 24.03.2026).
8. Polycrystalline Diamond Compact (PDC) Bits for Oil & Gas Drilling / Accio Energy. – 2026. URL: <https://www.accio.com/plp/polycrystalline-diamond-compact-pdc-bits> (дата обращения: 20.03.2026).
9. Diamond PDC Drill Bit: High-Strength Matrix Wear Resistance / Kingpdc Manufacturing. – 2025. URL: <https://www.kingpdc.com/diamond-pdc-drill-bit/> (дата обращения: 20.03.2026).
10. Математическое и численное моделирование напряженно-деформированного состояния вибро-ударного бурового инструмента // Научная электронная библиотека КиберЛенинка. – 2024. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematiceskoe-i-chislennoe-modelirovanie> (дата обращения: 21.03.2026).
11. Новые материалы для деталей горных машин: композиты Al-Cr₃C₂ / ГИАБ (Горный информационно-аналитический бюллетень). – 2023. – № 12-1. – С. 149-163.
12. Zhang Y., Liu W., Chen X., et al. Enhanced drilling performance of impregnated diamond bits by introducing novel HEA binder phase // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2024. – Vol. 118. – Article 106234. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2023.106234
13. Гибридные композиционные материалы CVD-алмаз/cBN / Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН. – М., 2017. URL: http://jnas.nbu.gov.ua/j-pdf/sm_2017_1_2.pdf (дата обращения: 28.03.2026).
14. Wear Resistance in 5-Blade Matrix Body PDC Drill Bits Explained / HNS Drill Bit Manufacturing Co. – 2026. URL: <https://www.hnsdrillbit.com/knowledge/wear-resistance-pdc-bits> (дата обращения: 20.03.2026).